

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

МАТВІЄНКО СЕРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 536.2.081.7:57.087.1

**ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ РЕЧОВИН ЗА ЇХ
ТЕПЛОПРОВІДНІСТЮ**

Спеціальність: 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення
складу речовин

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі виробництва приладів приладобудівного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент

Вислоух Сергій Петрович

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», доцент кафедри виробництва приладів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Ванкевич Петро Іванович

Національна академія сухопутних військ імені
гетьмана Петра Сагайдачного, провідний науковий
співробітник Наукового центру сухопутних військ

Кандидат технічних наук

Зайцева Олена Олександрівна

Державне підприємство "Всеукраїнський державний
науково-виробничий центр стандартизації, метрології,
сертифікації та захисту прав споживачів"

Мінекономіки України, заступник начальника науково-
виробничого відділу вимірювань температури,
кількості теплоти та витрати рідин

Захист відбудеться « 19 » березня 2019 р. о 16 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.18 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корп. №1, ауд. 293.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий « ____ » лютого 2019 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

доктор технічних наук, професор



Н.І. Бура

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Актуальною задачею науки, техніки та промисловості є контроль та визначення складу речовин у процесі виготовлення та застосування, а також при створенні речовин із заданими властивостями для їх використання в різноманітних сферах.

Одними з основних характеристик, що визначають властивості речовин і матеріалів, є їх теплофізичні характеристики. На їх величину суттєво впливає склад та концентрація його компонентів в речовині в процесі її використання. Іншим важливим фактором при визначенні теплофізичних характеристик (ТФХ) є наявність домішок в речовині, оскільки за різних режимів роботи теплотехнічного обладнання це може призводити до значного зниження надійності експлуатації та можливої відмови техніки.

Питання визначення складу речовин є актуальним для різних галузей, наприклад, в харчовій промисловості для виконання інженерних розрахунків, що пов'язані з роботою холодильного обладнання, з метою визначення необхідних режимів заморожування та висушування харчових продуктів необхідні достовірні дані про їх склад, що визначаються за величиною ТФХ.

Важливими є дослідження складу біологічних матеріалів за їх ТФХ в біології та медицині, оскільки за цими параметрами визначається наявність та ступінь імунологічної реакції на алерген у пацієнтів. Проте проведення таких досліджень ускладнено тим, що в них використовується обмежений об'єм досліджуваного матеріалу з огляду на велику кількість алергенів.

На сьогодні перспективним є впровадження нових теплоносіїв з покращеними теплофізичними властивостями, в якості яких застосовують нанорідини (колоїдні розчини твердих наночастинок в базовій рідині). За умов складного технологічного процесу створення нанорідин відсутність поетапного контролю унеможливорює оцінку якості технологічного циклу і, як наслідок, не дає змоги відтворити нанорідини із заданими властивостями.

Для контролю складу речовин за теплофізичними характеристиками важливим факторами є ймовірність і точність їх визначення. У випадках, коли досліджувана речовина неоднорідна, а її об'єм обмежений, в процесі контролю та визначення ТФХ нагрівання речовини здійснюють джерелом тепла малих розмірів. Це ускладнює контроль речовин за їх ТФХ внаслідок відсутності однозначної теорії та її експериментального підтвердження, що описувала б теплові процеси та явища, які відбуваються на мікротепловому рівні.

Зокрема, математичні моделі та методи визначення теплопровідності речовин не в повній мірі враховують всі складові процесу теплообміну, що не дозволяє отримати достовірні результати вимірювання їх ТФХ. А прилади для контролю та визначення складу речовин за їх ТФХ не забезпечують необхідні показники точності. Переважна більшість приладів здійснює вимірювання ТФХ тільки одного досліджуваного зразка за сеанс, що ускладнює процес отримання достовірних результатів досліджень.

Таким чином, актуальність роботи полягає у розв'язанні науково-практичної задачі вдосконалення методу контролю та визначення складу речовин за їх

теплопровідністю, а також створенні засобу з підвищеними показниками точності, продуктивності та розширеними функціональними можливостями для реалізації поставленої задачі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» і пов'язана з пошуком шляхів забезпечення якості та надійності приладів при здійсненні контролю за температурними режимами обробки деталей, згідно з НДР № 2026-п (ДР № 0117U004263) «Прилад вимірювання мікротвердості та шорсткості поверхні деталі в автоматичному режимі на верстатах з ЧПК». **Мета і завдання досліджень.**

Мета дисертаційної роботи полягає у вдосконаленні методу контролю складу речовин шляхом визначення їх теплопровідності та створенні засобу з підвищеними показниками точності, продуктивності та розширеними функціональними можливостями, що їх реалізує.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі основні наукові та прикладні задачі.

1. Виконати порівняльний аналіз сучасного стану теоретичних та практичних засад контролю складу речовин.

2. Обґрунтувати можливість контролю складу речовин шляхом визначення їх теплопровідності.

3. Розробити математичну модель визначення теплопровідності, що характеризує склад досліджуваної речовини.

4. Розробити багатоканальний прилад для одночасного контролю та вимірювання теплопровідності великої кількості зразків за однакових умов проведення досліджень з підвищеною точністю та продуктивністю.

5. Створити алгоритмічне та програмне забезпечення системи обробки результатів вимірювань.

6. Провести експериментальні дослідження ефективності використання запропонованого методу для визначення та контролю складу речовин на основі вимірювання їх теплопровідності з застосуванням розробленого приладу.

7. Виконати аналіз похибок вимірювання і обґрунтувати шляхи їх зниження та зменшення часу проведення досліджень.

8. Виконати апробацію та впровадження вдосконаленого методу контролю складу речовин за величиною їх теплопровідності.

Об'єктом дослідження є процес визначення та контролю складу речовин.

Предметом дослідження є теплопровідність речовин.

Методи дослідження: методи визначення та контролю складу речовин; теплові методи визначення та контролю ТФХ матеріалів при виборі найкращого для його реалізації; методи теоретичної теплофізики при визначенні теплових процесів в досліджуваному середовищі; методи побудови та проектування електронних вузлів при розробці багатоканального приладу для вимірювання ТФХ речовин та створенні експериментальної установки для вимірювання ТФХ твердих матеріалів; методи теорії ймовірностей та математичної статистики при обробці результатів експериментальних досліджень; методи алгоритмізації та програмування при

створенні програмного забезпечення системи визначення теплопровідності речовин.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному.

1. Вдосконалено метод контролю складу речовин шляхом визначення їх теплопровідності на основі вимірювання величини температури саморозігріву термістора в досліджуваному середовищі.

2. Вдосконалено математичну модель визначення теплопровідності речовин шляхом врахування умов розповсюдження теплової енергії від вкритого захисною оболонкою чутливого елементу, що дало можливість отримати результат вимірювання з похибкою не більше 3% при одночасних дослідженнях багатьох зразків мінімально можливого об'єму.

3. Вперше запропоновано спосіб визначення наявності та ступеню імунологічної реакції за відхиленням абсолютних значень теплопровідності суміші крові з алергеном від накопичених середньостатистичних даних, які отримано внаслідок імунологічної реакції.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному.

1. Створено дослідний зразок багатоканального приладу контролю складу речовин шляхом вимірювання їх теплопровідності із загальним часом дослідження не більше 20 хвилин. На створений прилад отримано патент України на винахід за №113044 від 25.11.2016.

2. На основі проведених експериментальних досліджень з використанням багатоканального приладу обґрунтовано шляхи підвищення точності, ймовірності та продуктивності вимірювання коефіцієнта теплопровідності досліджуваних речовин та запропоновано алгоритмічні, схемо-технічні та конструктивно-технологічні рекомендації для їх реалізації.

3. Вперше за результатами дослідження теплопровідності суміші крові з алергенами за допомогою розробленого приладу встановлено характер зміни її величини в залежності від концентрації алергенів та температури, що дало змогу реєструвати наявність та ступінь імунологічних реакцій.

4. Вперше запропоновано та обґрунтовано режими роботи та конструкцію чутливих елементів в залежності від їх ТФХ, що дозволило забезпечити ефективний контроль, підвищити продуктивність, знизити похибку вимірювання теплопровідності речовин за одночасного зменшення об'єму досліджуваного зразка.

5. Вперше створено експериментальну установку для практичної перевірки запропонованого методу контролю та визначення якості виробів з цих матеріалів за їх ТФХ та проведено необхідні вимірювання, що дозволяє використовувати її для відповідних досліджень. Результати роботи впроваджені в виробничий процес ТОВ «ВІРКОМ» та ПП «УКРТЕХМЕД».

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати дисертації, що складають сутність роботи і знайшли відображення в пунктах новизни та практичної цінності, отримані автором самостійно. У роботах, що опубліковані у співавторстві, здобувачу належить: дослідження можливості використання методу прямого підігріву термістора для вимірювання ТФХ рідин та твердих матеріалів [1-3]; розробка основних вимог до приладів з вимірювання ТФХ різноманітних матеріалів [4]; розробка експериментальної установки для вимірювання теплопровідності твердих матеріалів методом імпульсного розігріву термістора [5]; розробка

конструкції блоку зондів для вимірювання теплопровідності твердих матеріалів [5]; розробка програмного забезпечення для розрахунку теплопровідності твердих матеріалів за даними термограм розігріву термістора [5]; розробка алгоритму вимірювання ТФХ рідин та твердих матеріалів методом прямого підігріву термістора [7]; розробка конструкції вимірювальних зондів для визначення ТФХ різноманітних матеріалів (рідких, твердих, умовно твердих, газів) методом прямого підігріву термістора [8, 21]; аналіз сучасних методів та пристроїв дослідження ТФХ рідин та твердих матеріалів [9]; розробка математичної моделі розповсюдження теплової енергії від термістора при його розігріві [9]; розробка функціональної моделі багатоканального приладу для вимірювання ТФХ рідин методом прямого підігріву термістора [9,12]; розробка програмного забезпечення для розрахунку теплопровідності речовин за даними термограм розігріву термісторів багатоканального приладу [9,10]; створення багатоканального приладу для вимірювання ТФХ речовин методом прямого підігріву термістора [9]; аналіз причин виникнення похибки вимірювання та можливості підвищення точності вимірювання ТФХ речовин методом прямого підігріву термістора [9]; дослідження конструктивних особливостей приладів для вимірювання ТФХ біологічних матеріалів методом прямого підігріву термістора [9,13]; розробка способу реєстрації теплових процесів у біологічних пробах та способу визначення ступеня імунологічної реакції за ТФХ сумішей біологічних проб та алергенів [12]; обґрунтування та розробка математичної моделі розрахунку ТФХ матеріалів за даними термограм розігріву термістора [12, 14]; аналіз та дослідження раціональних методів вимірювання теплопровідності рідин та твердих матеріалів [14]; аналіз результатів вимірювання теплопровідності крові та розробка методики її вимірювання [15]; аналіз методів підвищення точності вимірювання коефіцієнта теплопровідності речовин методом прямого підігріву термістора [16]; розробка методики проведення досліджень по вимірюванню ТФХ нанорідин [17]; аналіз даних вимірювання та розробка рекомендацій зі зменшення похибки вимірювання теплопровідності твердих матеріалів [18]; розробка методики проведення досліджень впливу процесів конвекції в рідинах на похибку вимірювання теплопровідності та обробка даних вимірювання [19]; аналіз даних вимірювання та розробка рекомендацій зі зменшення похибки вимірювання теплопровідності крові та її розчинів [20, 22]; обґрунтування можливості контролю вмісту неоднорідних речовин, а саме при випаданні осаду або розшаруванні досліджуваної суміші [6, 21, 23]. Також автором проведено необхідні експериментальні дослідження, що знайшли відображення в [2, 5, 9, 14, 15, 16, 18-20].

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи апробовані на: VII Международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2014», г.Минск, 2014г.; X Международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2017», г.Минск, 2017 г.; 8-ой, 9-ой Международной научно - технической конференции молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения», г.Минск, 2015, 2016 гг.; Науково-технічній конференції «Інформатика, Математика, Автоматика. ІМА :2016», Суми, 2016р.; VIII та X науково-практичній конференції студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування». м. Київ, 2015, 2017 рр.; 14-й,

15-й, 16-й та 17-й Міжнародних науково-технічних конференціях «Приладобудування: стан і перспективи», м. Київ, 2015, 2016, 2017, 2018 pp., 38th International Conference on ELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY (ELNANO), IEEE, Kyiv, Ukraine, 2018.

Результати досліджень доповідались та обговорювались на наукових семінарах кафедри виробництва приладів та кафедри наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем приладобудівного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Основні теоретичні та практичні питання визначення складу речовин за їх теплопровідністю використовуються в навчальному процесі кафедри виробництва приладів КПІ ім. Ігоря Сікорського при проведенні лекційних та практичних занять з дисципліни «Матеріалознавство».

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 23 наукові праці, у тому числі 6 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у виданнях іноземних держав, 5 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 1 патент України на винахід, 1 патент на корисну модель, 14 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій та 1 стаття в іншому виданні.

Структура й обсяг дисертації. Робота складається з вступу, п'яти розділів, загальних висновків, додатків і списку використаних джерел зі 139 найменувань. Загальний обсяг дисертації становить 254 сторінки, з яких 170 сторінок основного тексту, містить 87 ілюстрацій, 9 таблиць та 7 додатків на 41 сторінці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** до дисертації представлено сучасний стан наукової задачі, обґрунтовано актуальність теми дисертаційних досліджень, сформульовано мету роботи та основні задачі досліджень, відображено наукову новизну і практичне значення роботи та отримані результати, визначено особистий внесок здобувача, наведено дані про структуру дисертації, наведено відомості про публікації та апробацію результатів дисертаційних досліджень.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасного стану контролю та визначення складу речовин за їх ТФХ, визначено актуальність дослідження складу речовин за їх теплофізичними властивостями в різних предметних областях, наведено загальну характеристику методів контролю ТФХ речовин, виконано аналіз існуючих засобів контролю та визначення теплофізичних властивостей речовин, запропоновано ефективний метод визначення теплопровідності речовин та проведено аналіз сучасного стану застосування методу прямого підігріву термістора для визначення ТФХ речовин.

Проблеми дослідження складу речовин за їх ТФХ розглядались в роботах Бурової З.А., Шангіна В.В., Шмелькова Д.А., Скрипова П.В., Декуші Л.В., Дівіна А.Г., Старостіна А.А., Воробйова Л.Й., Варгафтика В.П., Сіманкової Д.С., Коротких А.Г., Івлієва А.Д., Акуленка Д.В., Шимчука М.О., Кубікара Л. (Kubičár L.), Багеля Л. (Bágeľ L.), Вретенара В. (Vretenár V.), Стофаніка В. (Štofánik V.), Джонатана В. Вальвано (Jonathan W. Valvano), Андерсона Г.Т. (Anderson G.T.), Аркіна Г. (Arkin H.), Мартена Ф. ван-Гелдера (Maarten F. van Gelder), Гонзалез-Мендізабала Д.П. (Gonzalez-Mendizabal D.P.) та інших роботах.

На основі аналізу літературних джерел встановлено, що ефективний метод дослідження речовин ґрунтується на визначенні їх ТФХ, зокрема теплопровідності. Відсутній однозначний опис теплофізичних механізмів, що відбуваються протягом короткочасного нагрівання різноманітних речовин (харчових продуктів, біологічних матеріалів, охолоджуючих речовин, нанорідин тощо) джерелом тепла малих розмірів.

Існуючі методи, що застосовуються для визначення складу речовин за їх ТФХ є складними в реалізації, вимагають довготривалих вимірювань, пред'являють підвищені вимоги до умов досліджень, потребують тривалого процесу налаштування, характеризуються складністю конструкції вимірювальної комірки з речовиною, мають обмежену чутливість датчиків та вимагають великого об'єму досліджуваної речовини, що призводить до значної похибки вимірювань. Це суттєво обмежує можливості методу контролю складу речовини за величиною її теплопровідності для його практичного використання.

Шляхом порівняльного аналізу стаціонарних та нестаціонарних методів визначення складу речовин за їх ТФХ запропоновано використовувати нестаціонарний, контактний та одnobічний метод теплового неруйнівного контролю. Обґрунтовано застосування методу прямого підігріву термістора, оскільки завдяки конструктивній простоті та мініатюрності датчика він забезпечує вимірювання ТФХ досліджуваних речовин за мінімального їх об'єму.

Оскільки теплові вимірювання не мають масового характеру, на сьогодні для контролю та визначення складу речовин та їх ТФХ використовують прилади, що виготовляються невеликими партіями або в одиничних екземплярах. При цьому застосовуються засоби для визначення ТФХ речовин, вимірювальні комірки яких є конструктивно складними, потребують використання значного об'єму досліджуваної речовини та не дозволяють виконувати одночасне вимірювання багатьох досліджуваних зразків, а похибка вимірювання при цьому є значною. В багатьох випадках величина цієї похибки не задовольняє вимогам до проведення теплофізичних досліджень.

В дисертаційній роботі задачу контролю складу речовин пропонується розв'язати шляхом визначення їх теплопровідності як основного параметру ТФХ за допомогою методу прямого підігріву термістора, вдосконалення відповідної математичної моделі та розроблення приладу, що їх реалізує.

Другий розділ присвячено науковому обґрунтуванню вибору методу визначення теплопровідності речовин для контролю їх складу. Вибрано чутливі елементи та наведено конструкцію чутливого елементу з застосуванням термістора. Наведено вдосконалену математичну модель визначення теплопровідності речовин за даними термограм розігріву термістора. Обґрунтовано необхідність введення корегуючих коефіцієнтів в розрахункову формулу методу. Представлено структурну схему вимірювального каналу приладу для визначення ТФХ речовин.

Обґрунтовано застосування термістора з негативним температурним коефіцієнтом опору серії NTC RH16 – 3G202FB компанії «Mitsubishi Materials Corporation» в якості чутливого елементу в схемі вимірювання.

Як метод вимірювання ТФХ речовин вибрано прямий підігрів термістора, який має ряд переваг перед іншими методами. Основними перевагами методу є малі

розміри термістора та сферична форма його голівки, що значно спрощує конструкцію вимірювального зонду. Використання термістора дозволяє вимірювати ТФХ досліджуваних речовин в мінімальному їх об'ємі. Сутність методу прямого підігріву термістора полягає в використанні явища його саморозігріву за рахунок протікання через нього електричного струму. При цьому використовується ділянка вольт-амперної характеристики, де зменшення опору термістора більше ніж відносне збільшення струму. На цій ділянці проявляється ефект саморозігріву термістора і величина падіння опору буде залежати від температури розігріву термістора, тобто від навколишнього середовища, в якому він знаходиться.

В результаті аналізу схеми розповсюдження теплової енергії від термісторного зонду встановлено, що при саморозігріві термістора електричним імпульсом потік тепла q (рис. 1) розповсюджується в напрямку картриджа термостата через стінки пробірки.

На шляху розповсюдження тепла тепловий потік послідовно зустрічає термічні опори оболонки термістора $R_{об.}$, досліджуваної речовини $R_{досл. рід.}$, пробірки $R_{проб.}$, повітряного зазору між пробіркою та стінкою лунки картриджу термостата $R_{пов. заз.}$ та термічний опір картриджу термостата $R_{картр.}$. Окрім цього, від оболонки термістора відтік тепла здійснюється також через тримач термістора в напрямку закріплення термісторного зонду, яке має температуру навколишнього середовища. Термічний опір тримача $R_{трим.}$ визначається за ТФХ матеріалу, з якого він виготовлений, та його розмірами.

Враховуючи те, що нагрівання термістора триває досить швидко і за цей час тепло від термістора майже не розповсюджується за межі пробірки, то опори пробірки, повітряного зазору між пробіркою та картриджем термостата не враховувались.

Кристал термістора вкритий захисною оболонкою із скла або епоксидної смоли, власні ТФХ яких створюють додатковий тепловий опір на шляху розігріву термістором досліджуваної речовини і, як наслідок, призводить до додаткового саморозігріву термістора.

При визначенні теплопровідності речовини враховано електричні характеристики вимірювального каналу приладу, структурна схема якого приведена на рис. 2.

Це обумовлює необхідність введення в розрахункові залежності для визначення теплопровідності досліджуваних речовин корегуючих коефіцієнтів, які визначаються шляхом тестування термісторів з використанням еталонних речовин з відомими ТФХ.

Тоді формула для розрахунку коефіцієнта теплопровідності набуває такого вигляду:

$$\lambda_{д.р.} = \frac{P_T K_0}{4\pi r (\Delta T_e - \Delta T_0)}, \quad (1)$$

де $\lambda_{д.р.}$ – коефіцієнт теплопровідності досліджуваної речовини, Вт/(м·К); ΔT_e – виміряна температура розігріву термістора, К; ΔT_0 – температура саморозігріву

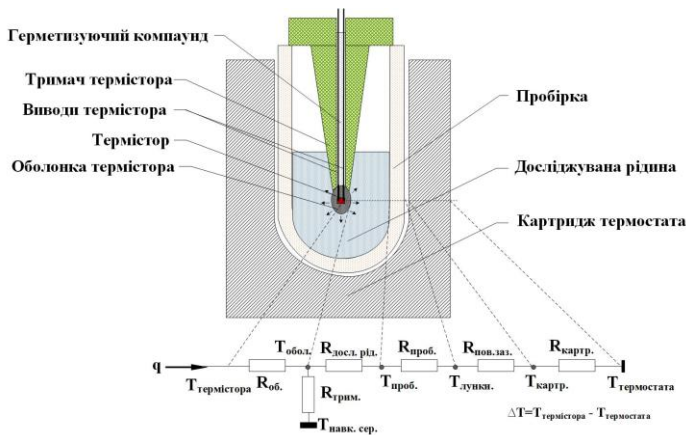


Рис. 1. Схема розповсюдження теплової енергії від термісторного зонду.

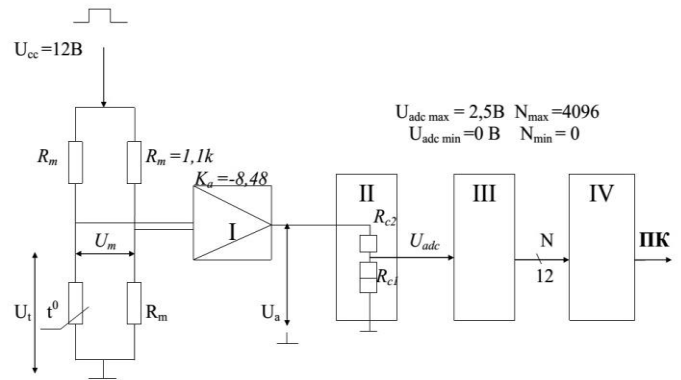


Рис. 2. Структурна схема вимірювального каналу приладу: I – підсилювач, II – дільник, III – АЦП, IV – мікроконтролер.

термістора, що визначена за результатами досліджень з використанням еталонних речовин, K ; K_0 – коефіцієнт пропорційності, який визначається за результатами досліджень з використанням еталонних речовин, та характеризує чутливість термісторного зонду до значення теплопровідності досліджуваної речовини, яка його оточує.

Коефіцієнт пропорційності K_0 , визначається за формулою:

$$K_0 = \frac{(\Delta T_{em.2в.} - \Delta T_{em.1в.})}{(\Delta T_{em.2р.} - \Delta T_{em.1р.})}, \quad (2)$$

де $\Delta T_{em.2в.}$ та $\Delta T_{em.1в.}$ – значення температури розігріву термістора, що визначені за результатами досліджень з використанням еталонних речовин відповідно з найменшим коефіцієнтом теплопровідності, наприклад, 96% розчин етилового спирту ($\Delta T_{em.2в.}$) та найбільшим коефіцієнтом теплопровідності, наприклад, дистильованої води ($\Delta T_{em.1в.}$); $\Delta T_{em.2р.}$ та $\Delta T_{em.1р.}$ – розрахункові значення температури розігріву термістора для еталонних речовин відповідно з найменшим коефіцієнтом теплопровідності, наприклад, 96% розчин етилового спирту ($\Delta T_{em.2р.}$) та найбільшим коефіцієнтом теплопровідності, наприклад, дистильованої води ($\Delta T_{em.1р.}$).

Температура саморозігріву термістора ΔT_0 , що викликана наявністю оболонки, визначається за формулою:

$$\Delta T_0 = \Delta T_{em.2в.} - \frac{(\Delta T_{em.2в.} - \Delta T_{em.1в.}) \Delta T_{em.2р.}}{(\Delta T_{em.2р.} - \Delta T_{em.1р.})}. \quad (3)$$

Значення температури розігріву термістора еталонних речовин представлено у вигляді числових значень на виході аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Ці значення пропорційні напрузі розбалансування вимірювального мосту і температурі термістора. Вважаючи, що залежність $T = f(N_{АЦП})$ є лінійною, то температура розігріву термістора визначається як:

$$\Delta T_{\epsilon} = (N_{3\epsilon} - N_{1\epsilon}) K_T, \quad (4)$$

де ΔT_{ϵ} – температура розігріву термістора за даними вимірювання;

$N_{3\theta}$ – вимірне числове значення в кінцевій точці термограми розігріву термістора;
 $N_{I\theta}$ – вимірне числове значення в початковій точці термограми розігріву термістора;

K_T – коефіцієнт, що відповідає тангенсу кута нахилу функції $T=T_0+N_{АЦП} K_T$, який визначається за графіком залежності температури термістора T від числових значень розбалансування вимірювального мосту $N_{АЦП}$, та дорівнює:

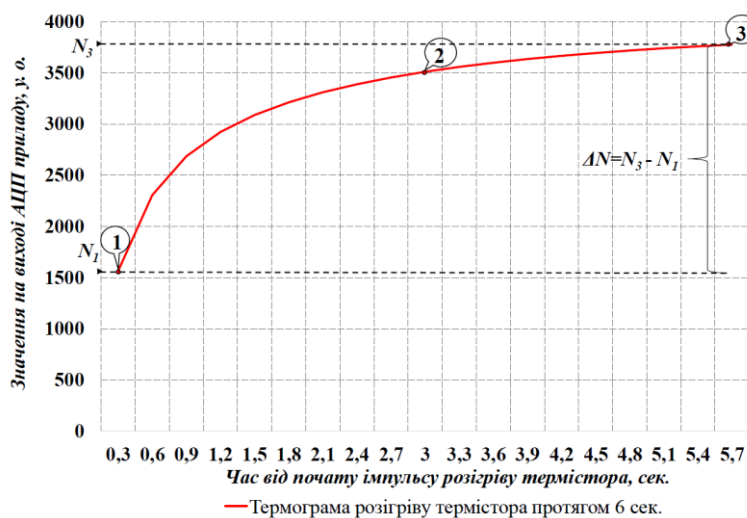
$$K_T = \frac{T_{(+40)} - T_0}{N_{(+40)}}, \quad (5)$$

де $T_{(+40)}$ – температура розігріву термістора, що дорівнює +313,15 К;

T_0 – числове значення температури розігріву термістора, при якій $N_{АЦП} = 0$;

$N_{(+40)}$ – числове значення на виході АЦП при температурі розігріву термістора +40°C, що є середньою температурою проведення комплексу вимірювань.

Вимірювальний міст приладу складається з термістора і трьох прецизійних резисторів $R_m (\pm 1 \%)$, номінальний опір яких дорівнює опорі термістора при температурі +40 °С. Напруга в діагоналі моста підсилювалась підсилювачем і подавалась через дільник $R_{c1}/(R_{c1}+R_{c2})$ на АЦП. На виході АЦП отримували числове значення, що пропорційне напрузі розбалансу моста, яке вимірювали мікроконтролером протягом тривалості імпульсу розігріву (6 секунд) і передавали до ПК. За одержаною термограмою розігріву термістора (рис. 3) визначали його температуру розігріву під дією імпульсу струму в умовних одиницях на виході



АЦП, як $\Delta N = N_3 - N_I$, де N_3 та N_I відповідно кінцева (точка 3) та початкова точки (точка 1) термограми розігріву, а N_2 (точка 2) на термограмі – середина імпульсу розігріву термістора.

При цьому числове значення ΔN на виході АЦП прямо пропорційне напрузі розбалансу вимірювального мосту та прямо пропорційне опорі термістора, який в свою чергу залежить від його температури.

Оскільки залежність опорі термістора від його температури

має нелінійний характер, то значення температури термістора на виході АЦП буде представлятись як $T=f(N_{АЦП})$.

Для спрощення розрахунків при визначенні коефіцієнта теплопровідності нелінійну функцію $T=f(N_{АЦП})$ замінювали на лінійну $T= T_0+NK_T$, де T_0 – температура термістора при числовому значенні на виході АЦП, що дорівнює нулю, а K_T – тангенс кута нахилу функції $T=f(N_{АЦП})$.

Так, при визначенні температури розігріву термістора ΔT_θ значення її похибки залежить від температури досліджуваного зразка. Тому для збільшення точності

вимірювання в формулу розрахунку коефіцієнта теплопровідності введено відповідні корегуючі коефіцієнти. За умови використання декількох чутливих елементів ці коефіцієнти визначали індивідуально для кожного із них шляхом калібрування з використанням еталонних речовин з відомими ТФХ, причому процес калібрування проводили в робочому діапазоні температур досліджуваних зразків.

Таким чином, вдосконалена математична модель матиме наступний вигляд:

$$\lambda_{\partial.p.i.} = \frac{P_T K_0}{4\pi r \left(((N_{3ei} - N_{1ei}) - (N_{(+40)} - K_{ni} N_{1ei}) K_{Pi}) K_{ki} \frac{T_{(+40)} - T_0}{N_{(+40)}} - \Delta T_0 \right)}, \quad (6)$$

де $\lambda_{\partial.p.i.}$ – коефіцієнт теплопровідності досліджуваної речовини, що визначено за даними вимірювання i -тим термісторним зондом; K_{ni} – коефіцієнт, що корегує похибку вимірювання температури досліджуваного зразка i -тим термістором; K_{Pi} – коефіцієнт, що здійснює компенсацію похибки різниці значень на виході АЦП до середньостатистичного значення, яке вимірює i -тим термістором; K_{ki} – коефіцієнт, що корегує чутливість i -го термістора, тобто коефіцієнт відхилення реальної характеристики, що отримана за даними досліджень, від розрахункової; $N_{(+40)}$ – значення на виході АЦП при температурі зонда +313,15 К; ΔT_0 – температура саморозігріву термістора, що викликана наявністю у нього оболонки, К; K_0 – коефіцієнт пропорційності, що визначає чутливість термістора до значення теплопровідності досліджуваної речовини, яка його оточує; N_{3ei} і N_{1ei} – числові значення в кінцевій та в початковій точках на термограмі розігріву термістора відповідно, що одержані в результаті вимірювання.

Коефіцієнти K_{ni} , K_{Pi} , K_{ki} визначали для кожного термістора окремо в ході калібрувальних процедур з використанням еталонних речовин з відомими ТФХ. Ці коефіцієнти є характеристиками термісторного зонду. Коефіцієнт K_0 також визначали за даними калібрувальних досліджень з використанням в якості еталонних речовин з відомими ТФХ.

Запропонована математична модель на відміну від існуючих, враховує умови розповсюдження теплової енергії від чутливого елемента при вимірюванні температури досліджуваного зразка, зміну потужності термістора в процесі його нагрівання і чутливість термісторного зонду до значення теплопровідності досліджуваної речовини.

Вдосконалено метод контролю складу речовин при визначенні їх теплопровідності на основі використання покращеної математичної моделі та виміряної величини саморозігріву термістора у методі його прямого підігріву.

В **третьому розділі** наведено конструкцію розробленого багатоканального приладу для контролю та визначення складу рідких досліджуваних речовин, його функціональну схему, а також відповідне математичне та програмне забезпечення системи керування процесом вимірювання та опрацювання результатів досліджень. Представлено методологію проведення експериментальних досліджень та надано результати вимірювання досліджуваних речовин з коефіцієнтами теплопровідності в діапазоні від 0,1 Вт/м*К до 1,0 Вт/м*К за допомогою розробленого приладу. Розроблено методику визначення складу речовин з застосуванням методу прямого підігріву термістора та представлено відповідні результати досліджень.

Функціональна схема розробленого приладу для вимірювання теплопровідності речовин наведена на рис. 4.

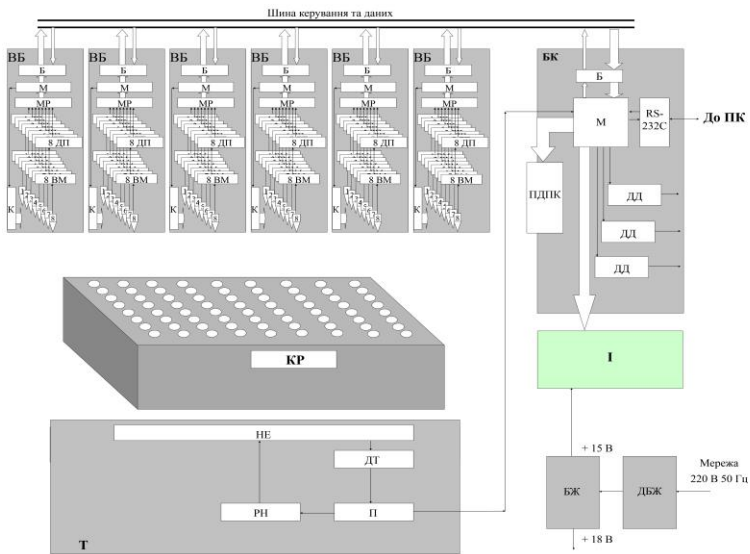


Рис. 4. Функціональна схема приладу, де ВБ – вимірювальний блок; Б – буфер; М – мікроконтролер; МР – мультиплексор; ДП – диференційний підсилювач; ВМ – вимірювальний модуль; 1...8 – вимірювальні зонди; КР – контейнер; Т – термостат; НЕ – нагрівальний елемент; РН – регулятор напруги; ДТ – датчик температури; П – підсилювач; БК – блок керування; ПДПК – порт датчиків положення контейнера; ДД – драйвер двигуна; І – індикатор; БЖ – блок живлення; ДБЖ – джерело безперебійного живлення; ПК – персональний комп'ютер.

мікроконтролером вимірювального блоку.

Живлення вимірювального мосту здійснюється від джерела опорної напруги постійного струму $+12 \pm 2\%$ В. Значення напруги вибрано таким чином, щоб забезпечити роботу термістора на ділянці падіння напруги вольт-амперної характеристики, де зменшення опору більше ніж відносне збільшення струму.

Ввімкнення живлення вимірювального мосту здійснюється за сигналом з мікроконтролера на час, який дорівнює постійній часу термістора (6 сек.). Після цього витримується пауза для охолодження термістора (20 сек.). При ввімкненні ключа на вимірювальний міст подається напруга і термістор нагрівається. Тривалості імпульсу достатньо для того, щоб виміряти температуру саморозігріву термістора, на яку впливає ТФХ середовища, що оточує термістор. Поточний процес розігріву термістора протягом тривалості імпульсу заноситься в пам'ять мікроконтролера. Дані, що одержані в процесі вимірювання теплопровідності, після

Прилад складається з таких основних елементів: вимірювальний модуль (ВМ) з шістьма конструктивно об'єднаними вимірювальними блоками (ВБ); блок керування приладом (БК); термостат, в який встановлюється контейнер з дослідними зразками; блок живлення приладу (БЖ) з зовнішнім джерелом безперебійного живлення (ДБЖ). В приладі кожен із шести вимірювальних блоків містить 10 вимірювальних зондів, які занурюються в досліджувану речовину. Вимірювальний зонд має конічну форму з термістором на вістрі, що ввімкнено в одне із плечей вимірювального мосту, сигнал розбалансу якого підсилюється диференціальним (інструментальним) підсилювачем і подається через мультиплексор на 12-ти розрядний аналого-цифровий перетворювач. Числові значення розбалансу всіх 10-ти вимірювальних мостів з виходу АЦП по чергово запам'ятовується

закінчення сеансу передаються мікроконтролером блоку керування у вигляді файлу до ПК.

Контейнер з пробірками розміщується в термостаті приладу для забезпечення постійної температури зразків при проведенні досліджень, він нагрівається до температури $+40 \pm 0,5$ °C. Потужність нагрівача термостата встановлюється за допомогою регулятора напруги і контролюється датчиком температури контейнера. Живлення вузлів приладу забезпечується блоком живлення, який підключений до мережі змінного струму напругою 220 В та частотою 50 Гц через джерело безперебійного живлення. Поточний стан приладу та температура контейнера з досліджуваними зразками відображається на індикаторі приладу. Розташування вимірювального модулю та термостата контролюється за допомогою датчиків (кінцевих вимикачів), що виключає можливість механічного пошкодження зондів при переміщенні термостата.

Керування процесом дослідження здійснюється за допомогою програми з назвою «Analyser50», яку розроблено з використанням пакету *Microsoft Visual C++*.

Для опрацювання результатів вимірювань та визначення теплопровідності досліджуваних речовин розроблена програма «Analyser2015», меню інтерфейсного вікна якої складається з семи сторінок: «Дані вимірювання», «Корегування», «Розрахунки», «Коефіцієнти», «Результати розрахунків», «Формування БД», «Звіт».

З метою визначення ефективності застосування запропонованої методики та відповідних засобів вимірювання коефіцієнтів теплопровідності проведено експериментальні дослідження з використанням таких речовин: дистильована вода; фізіологічний розчин (розчин 0,9% NaCl в дистильованій воді); молоко 2,5% жирності; 25% розчин етилового спирту в дистильованій воді; 60% розчин гліцерину в дистильованій воді; 80% розчин гліцерину в дистильованій воді; 85% розчин гліцерину в дистильованій воді (розчин нашкірний 85%, медичний); 70% розчин етилового спирту в дистильованій воді («Септол»); 75% розчин етилового спирту в дистильованій воді; етиловий спирт медичний 96-Екстра (96% розчин етилового спирту в дистильованій воді).

Результати вимірювання коефіцієнта теплопровідності досліджуваних речовин наведено в таблиці 1.

Порівняльний аналіз отриманих значень коефіцієнтів теплопровідності досліджуваних речовин з відповідними даними з літературних джерел показав, що їх розбіжність не перевищує 2%.

Для перевірки адекватності запропонованої математичної моделі визначення коефіцієнта теплопровідності досліджуваних речовин використано результати комплексу сеансів вимірювання, результати яких наведено в таблиці 1. Встановлено, що за критерієм Фішера отримана математична є адекватною з довірчою ймовірністю 0,95, оскільки розрахункове значення критерію F_p , що становить 1,12261825, не перевищує табличного (критичного) значення $F_{табл}$, яке дорівнює 1,8307 при рівні значущості $\alpha=0,05$ і кількості ступенів свободи $f_1=10$ і $f_2=990$ відповідно.

Для визначення відносного складу компонентів в речовинах (сумішах) за допомогою розробленого приладу здійснювалось калібрування з використанням сумішей з відомим складом.

Таблиця 1. Результати вимірювання коефіцієнта теплопровідності речовин.

| Досліджувана речовина | Коефіцієнт теплопровідності | | |
|--|---|---|------------------------------|
| | Отримане значення коефіцієнта теплопровідності, Вт/(м* К) | Середньоквадратичне відхилення, Вт/(м* К) | Дані з довідників, Вт/(м* К) |
| Дистильована вода | 0,6288 | 0,00688 | 0,628 |
| Фізіологічний розчин (розчин 0,9% NaCl у воді) | 0,6097 | 0,01003 | 0,612 |
| Молоко 2,5% | 0,5632 | 0,00707 | 0,564 |
| 25% розчин етилового спирту у воді | 0,4753 | 0,00918 | 0,477 |
| 60% розчин гліцерину в воді | 0,4001 | 0,00501 | 0,399 |
| 80% розчин гліцерину | 0,3408 | 0,00412 | 0,336 |
| Гліцерин 85% | 0,3233 | 0,005343 | 0,323 |
| Септол, 70% розчин етилового спирту у воді | 0,2601 | 0,003295 | 0,259 |
| 75% розчин етилового спирту у воді | 0,2445 | 0,002901 | 0,245 |
| Етиловий спирт медичний (96% розчин етилового спирту у воді) | 0,1741 | 0,003134 | 0,175 |

В якості досліджуваних речовин використано розчини гліцерину, етилового спирту та цукру у дистильованій воді. Залежність теплопровідності розчинів від об'ємного вмісту гліцерину, етилового спирту та цукру в їх водяних розчинах приведена на рис. 5.

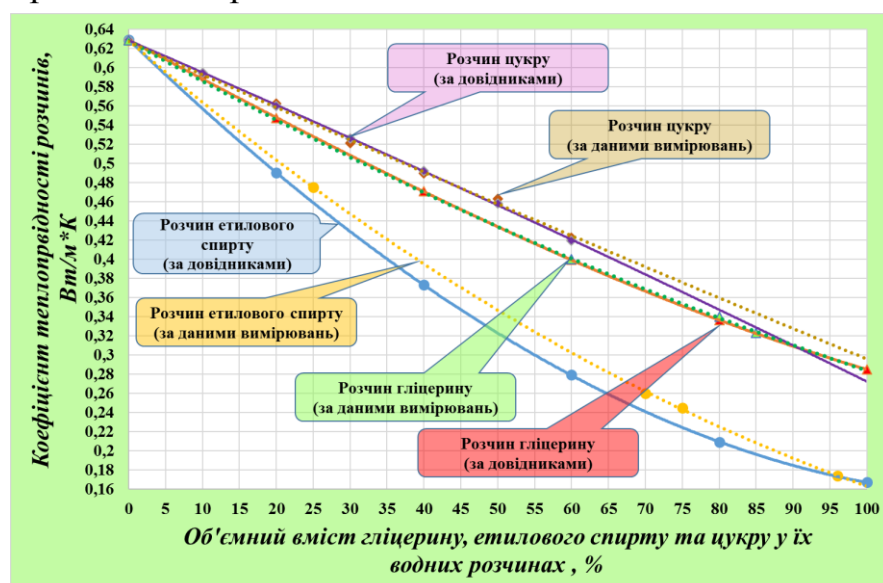


Рис. 5. Залежності теплопровідності розчинів від об'ємного вмісту гліцерину, етилового спирту та цукру в їх водяних розчинах.

Отримані залежності свідчать про те, що розрахункові значення теплопровідності розчинів об'ємного вмісту гліцерину та етилового спирту в водяних розчинах співпадають з отриманими значеннями за результатами експериментальних досліджень.

При цьому отримані функціональні залежності відсоткового вмісту речовин у розчині при температурі +40°C мають такий вигляд:

– для розчину етилового спирту у воді –

$$Y_{em. c.} = -905,16\lambda^3 + 1358,9\lambda^2 - 817,58\lambda + 201,71; \quad (7)$$

– для розчину гліцерину у воді –

$$Y_{gl.} = -710,75\lambda^3 + 1193,8\lambda^2 - 915,25\lambda + 280,14; \quad (8)$$

– для розчину цукру у воді –

$$Y_{ц.} = 1103,4\lambda^3 - 1792,5\lambda^2 + 671,64\lambda + 12,179, \quad (9)$$

де $Y_{em. c.}$, $Y_{gl.}$, $Y_{ц.}$ – відсотковий вміст відповідно етилового спирту, гліцерину та цукру у розчині (%), а λ – коефіцієнт теплопровідності розчину (Вт/м*К).

Графічні залежності об'ємного вмісту етилового спирту в його водяному розчині, гліцерину в водяному розчині та об'ємного вмісту цукру в водяному розчині за величиною теплопровідності розчинів та їх функціональні залежності наведено на рис. 6, рис. 7 та рис. 8 відповідно.

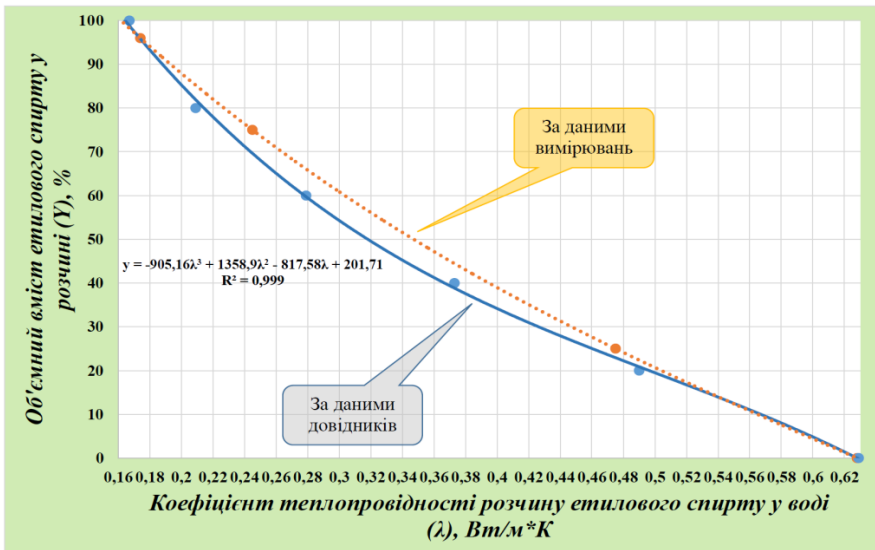


Рис. 6. Залежності об'ємного вмісту етилового спирту в його водяному розчині від величини теплопровідності розчину.

За одержаними результатами досліджень даними можна зробити висновок, що точність, з якою може бути визначено об'ємний вміст сумішей, залежить від значень коефіцієнтів теплопровідності компонентів. Встановлено, що похибка визначення об'ємного вмісту гліцерину в його водяному розчині більша в порівнянні з похибкою визначення об'ємного вмісту етилового спирту.

Отримані залежності абсолютної похибки визначення об'ємного вмісту речовини в розчині представлено формулами:

– для розчину етилового спирту у воді –

$$\Delta Y_{em. c.} = (-2715,48\lambda^2 + 2717,8\lambda - 817,58) \times \Delta\lambda_{em. cn.}; \quad (10)$$

– для розчину гліцерину у воді –

$$\Delta Y_{gl.} = (-2132,25\lambda^2 + 2387,6\lambda - 915,25) \times \Delta\lambda_{gl.}; \quad (11)$$

– для розчину цукру у воді –

$$\Delta Y_{c.} = (3310,2\lambda^2 - 3585\lambda + 671,64) \times \Delta\lambda_{c.}, \quad (12)$$

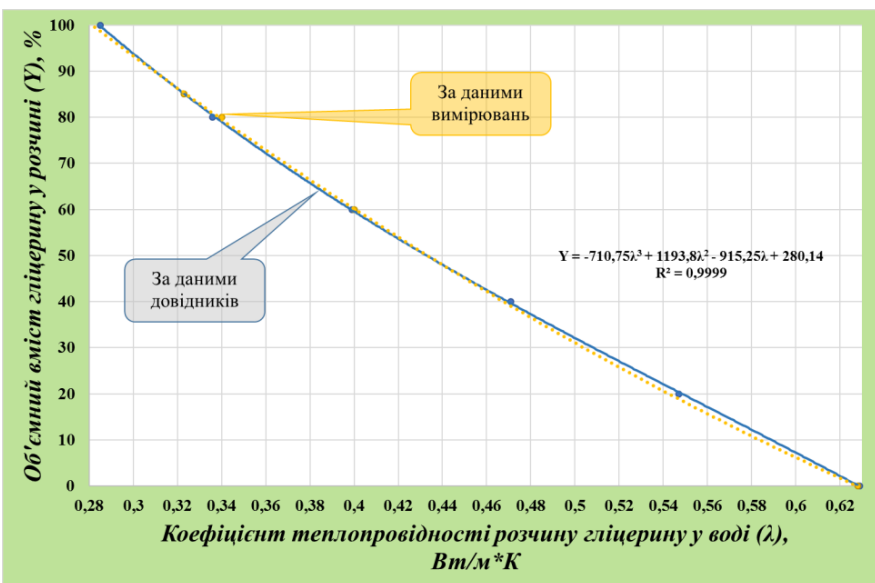


Рис. 7. Залежності об'ємного вмісту гліцерину в його водяному розчині від величини теплопровідності розчину.

де $\Delta Y_{em. c.}$, $\Delta Y_{gl.}$, $\Delta Y_{c.}$ – абсолютні похибки визначення об'ємного вмісту відповідно етилового спирту, гліцерину та цукру у розчині (%); $\Delta\lambda$ – абсолютні похибки вимірювання теплопровідності розчинів, відповідно етилового спирту, гліцерину та цукру (Вт/м*К).

При дослідженні теплопровідності молока з різним ступенем жирності

вставлено, що зі збільшенням вмісту жирів теплопровідність молока зменшується. За даними вимірювань теплопровідності молока в залежності від вмісту жирів при різних температурах отримано такі розрахункові формули:

$$\text{— при температурі } +30\text{ }^{\circ}\text{C: } Y_{\text{ж.м.}(+30)} = -121,95 \times \lambda_{\text{м.}(+30)} + 70,39; \quad (13)$$

$$\text{— при температурі } +35\text{ }^{\circ}\text{C: } Y_{\text{ж.м.}(+35)} = -125 \times \lambda_{\text{м.}(+35)} + 73,06; \quad (14)$$

$$\text{— при температурі } +40\text{ }^{\circ}\text{C: } Y_{\text{ж.м.}(+40)} = -128,1 \times \lambda_{\text{м.}(+40)} + 74,45, \quad (15)$$

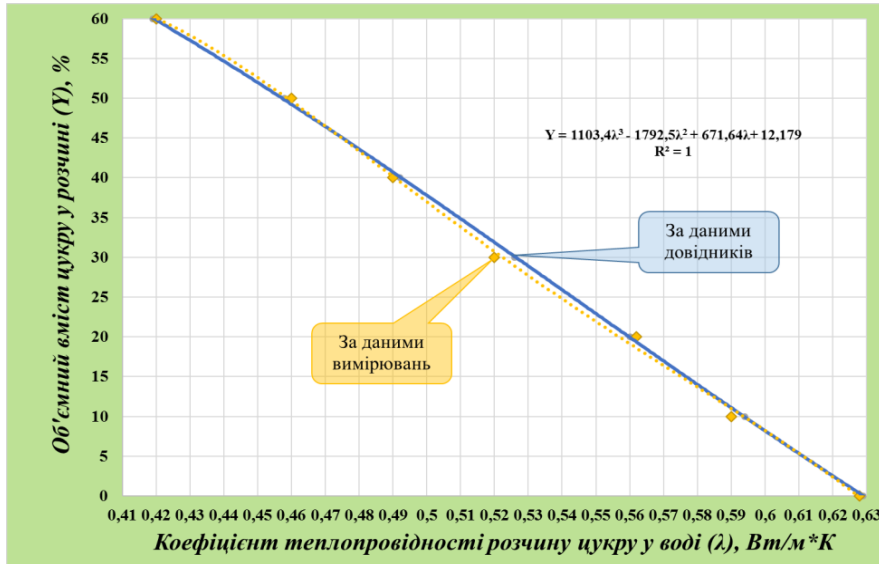


Рис. 8. Залежності об'ємного вмісту цукру в його водяному розчині від величини теплопровідності розчину.

де $Y_{\text{ж.м.}(+30)}$, $Y_{\text{ж.м.}(+35)}$, $Y_{\text{ж.м.}(+40)}$ — відсотковий вміст жиру в молоці відповідно при температурах $+30^{\circ}\text{C}$, $+35^{\circ}\text{C}$ та $+40^{\circ}\text{C}$ (%); $\lambda_{\text{м.}(+30)}$, $\lambda_{\text{м.}(+35)}$, $\lambda_{\text{м.}(+40)}$ — виміряна теплопровідність молока відповідно при температурах $+30^{\circ}\text{C}$, $+35^{\circ}\text{C}$ та $+40^{\circ}\text{C}$ (Вт/м*К). Результати багаторазового вимірювання теплопровідності молока показали, що при одночасному вимірюванні всіма 60 зондами протягом 10 сеансів по

10 хв. кожний (тобто з отриманням 1200 термограм) похибка вимірювання знижується до 1,2%.

За отриманими результатами досліджень встановлено, що точність, з якою може бути визначений об'ємний вміст сумішей, залежить від різниці теплопровідності компонентів. Так, в даному випадку похибка визначення об'ємного вмісту гліцерину та цукру в їх водяних розчинах більша ніж похибка визначення об'ємного вмісту етилового спирту. А при вимірюванні теплопровідності біологічних матеріалів необхідно враховувати їх властивість змінювати з часом свій стан.

В **четвертому розділі** наведено дестабілізуючі фактори, які впливають на похибку вимірювання, запропоновано способи збільшення точності вимірювань, представлено заходи зі зменшення похибки визначення ТФХ речовин та наведено результати необхідних експериментальних досліджень.

Аналіз процесу визначення теплопровідності речовин дозволив встановити фактори, що впливають на похибку вимірювання, основними з яких є: відмінність розмірів оболонки термісторів, кліматичні умови, коливання температури термостата, порушення теплового контакту між термостатом та пробіркою, похибка при дозуванні речовини, забруднення зонду або досліджуваної речовини, пошкодження зонду чи зони вимірювання, осад або розшарування речовини.

При цьому, помилкові дії оператора також мають суттєве значення, оскільки недостатньо ретельна підготовка досліджуваного зразка до проведення вимірювань а також використання приладу в умовах наявності джерел електромагнітних перешкод, вібрації, коливань температури призводить до недостовірності отриманих даних досліджень.

Аналіз дестабілізуючих факторів та причин їх виникнення, що впливають на похибку визначення теплопровідності речовин, дозволив реалізувати заходи для її зменшення (рис. 9).

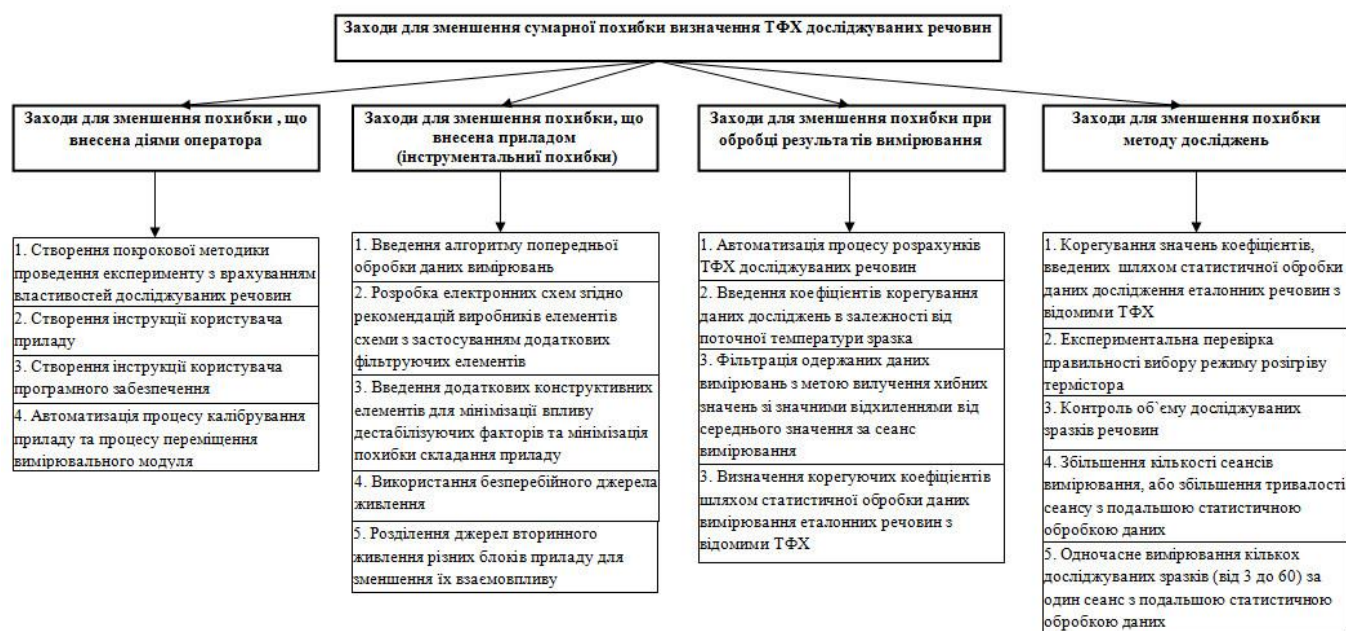


Рис. 9. Перелік заходів для зменшення похибки визначення ТФХ досліджуваних речовин.

Автоматизовано процес виконання розрахунків ТФХ досліджуваних речовин, що дозволив зменшити вплив суб'єктивного фактору на обчислювальну похибку опрацювання результатів вимірювання. Попередньо визначено корегуючі коефіцієнти, які враховують залежність отриманих даних від поточної температури зразка. Визначено корегуючі коефіцієнти, що отримані шляхом статистичної обробки даних вимірювання еталонних речовин з відомими ТФХ, а також здійснено фільтрацію даних вимірювань з метою витягнення недостовірних значень зі значними відхиленнями від середнього значення за сеанс вимірювання. Оцінку запропонованих методів і засобів підвищення точності визначення коефіцієнтів теплопровідності досліджуваних речовин виконано на основі 10, 20, 40, 60, та 1200 вимірянних термограм.

Результати визначення похибок вимірювання коефіцієнтів теплопровідності речовин в залежності від їх значень при різній кількості отриманих термограм представлено на рис. 10.

За отриманими результатами можна стверджувати, що середнє значення похибки вимірювання за один сеанс тривалістю 10 хв. одним зондом складало

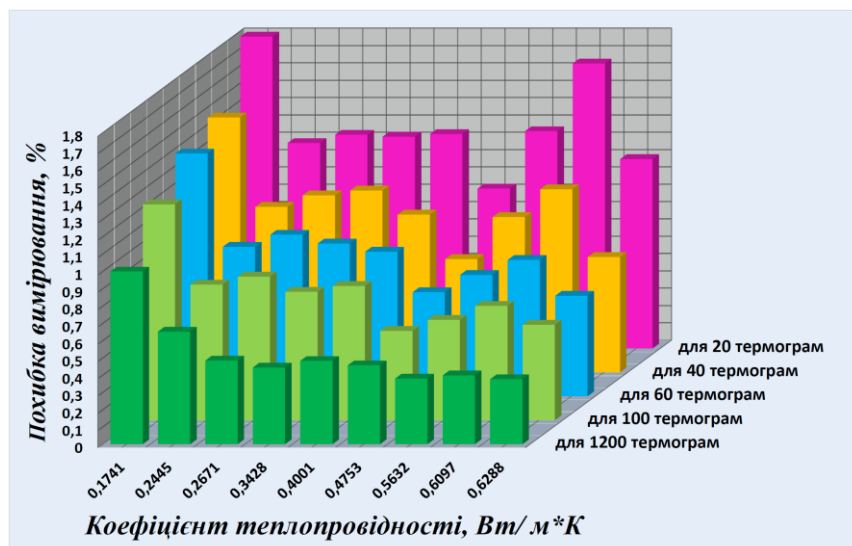


Рис. 10. Графіки похибок визначення коефіцієнтів теплопровідності при вимірюванні досліджуваних речовин, де величина похибки показана для 20, 40, 60, 100 та 1200 термограм.

різних агрегатних станах. Представлено експериментальну установку для вимірювання ТФХ твердих матеріалів та наведено результати досліджень вимірювання їх ТФХ. Розглянута можливість застосування розробленого приладу в біології та медицині та представлено результати досліджень імунологічної реакції пацієнтів на найбільш поширені алергени.

Для експериментальної установки при вимірюванні ТФХ твердих матеріалів розроблено конструкцію чутливого елемента, що має плоску поверхню теплового контакту з досліджуваним матеріалом. Експериментальна установка (рис. 11)

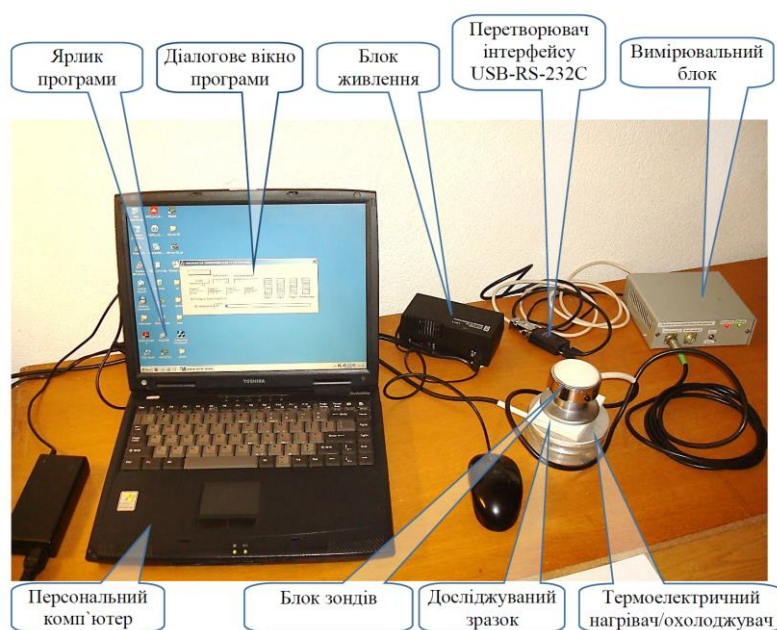


Рис. 11. Загальний вигляд експериментальної установки для вимірювання теплопровідності твердих матеріалів.

не більше 2 %, а при одночасному вимірюванні 60 зондами однієї і тієї ж досліджуваної речовини похибка не перевищувала 1,5 %.

При цьому похибка вимірювання теплопровідності речовин, відомими методами сягала від 3% до 8%, а запропонованим методом – зменшена до 1,5%

У п'ятому розділі наведено результати практичної апробації вдосконаленого методу визначення складу речовин в

складається з вимірювального блоку, блоку живлення, блоку зондів та термоелектричного нагрівача-охолоджувача. Принципова схема вимірювання теплопровідності в експериментальній установці аналогічна раніше описаному приладу для вимірювання теплопровідності рідких речовин.

Для проведення досліджень в широкому діапазоні температур досліджуваного матеріалу від +10°C до +40°C в установці використано термоелектричний охолоджувач-нагрівач на елементах Пельтьє. Таким чином забезпечується нагрів та охолод-

ження досліджуваних зразків. Його живлення здійснюється від окремого блоку. Блок зондів складається з чотирьох зондів. Три зонди, що мають опір 2 кОм, використовуються для вимірювання ТФХ матеріалу, а четвертий з високим опором 10 кОм – для вимірювання температури досліджуваного зразка.

Завдяки високому опору через нього проходить струм малої величини, тому тут відсутнє явище саморозігріву термістора. При цьому термістори ввімкнені в плечі вимірювальних мостів.

Проведені дослідження за допомогою розробленої експериментальної установки ТФХ різноманітних твердих матеріалів в діапазоні від 0,15 Вт/м*К до 0,7 Вт/м*К вказують на можливість використання методу прямого підігріву термістора для вимірювання теплопровідності твердих, умовно твердих та сипучих матеріалів.

Розглянуто можливість застосування розробленого приладу в біології та медицині, а саме – для виявлення імунологічної реакції біологічних проб.

З метою виявлення імунологічних реакцій пацієнтів шляхом вимірювання теплофізичних характеристик крові в суміші з алергенами проведено вимірювання коефіцієнтів теплопровідності різноманітних речовин: крові донорів; алергенів (алергени м'яса свинини, м'яса яловичини, курячих яєць, яблука, апельсину, малини, кави, пшеничної муки, квасолі, гороху, цибулі, помідору та ін.); 0,9% розчину NaCl (фізіологічного розчину); суміші «кров+алерген» різних донорів. Результати визначення коефіцієнта теплопровідності суміші для різних донорів та деяких алергенів представлено на діаграмі (рис. 12).

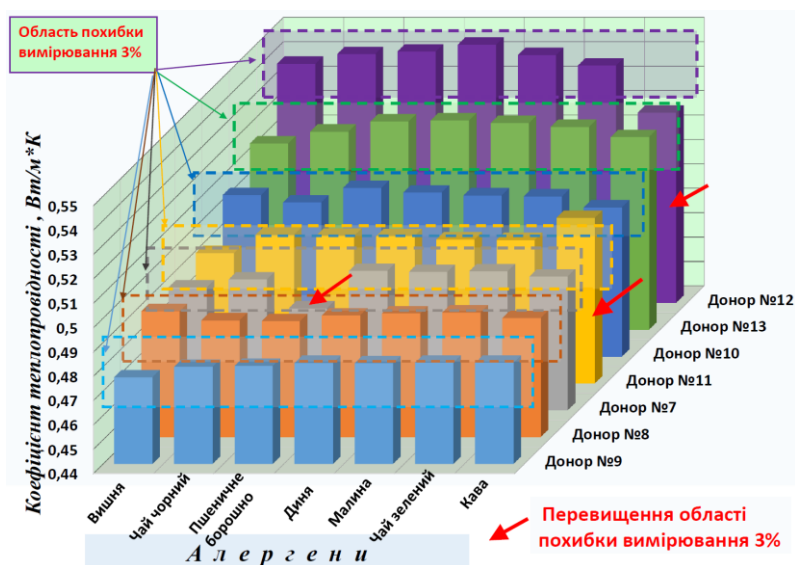


Рис. 12. Діаграма значень коефіцієнта теплопровідності суміші кров+алерген донорів (у %) порівняно з теплопровідністю фізрозчину.

Встановлено, що значення коефіцієнта теплопровідності крові різних пацієнтів коливається в межах 2%, а середньоквадратичне відхилення коефіцієнтів теплопровідності різних алергенів знаходиться в межах 2,6%.

Суттєве відхилення значення коефіцієнта теплопровідності компонентів суміші «кров+алерген» вказує на вплив певних алергенів на теплопровідність

Запропонований спосіб визначення наявності та ступеню імунологічної реакції для розчинів біологічних проб полягає в порівнянні значень математичного очікування коефіцієнтів теплопровідності, коефіцієнта асиметрії розподілення значень та середнього статистичного відхилення, що одержаних в результаті аналізу даних контрольних вимірювань та значень даних вимірювання з поправкою на зміну значення математичного очікування коефіцієнтів теплопровідності, викликану властивостями конкретної біологічної проби.

суміші у деяких донорів, що показує ефективність запропонованого методу при визначенні алергічної реакції у пацієнтів. При цьому, значення теплопровідності суміші «кров+алерген», за умови визначення з необхідною точністю, дозволяє підвищити ймовірність встановлення діагнозу захворювання і, як наслідок, збільшити ефективність подальшого лікування пацієнта.

Наведено практичну апробацію методики та приладу для визначення імунологічної реакції. Її результати підтвердили можливість визначення ступеню імунологічної реакції за аналізом ТФХ суміші «кров+алерген».

У додатках представлено графіки залежностей температури розігріву термістора, електричні схеми, конструктивні елементи приладу та вікна програми обробки результатів досліджень, результати досліджень з використанням різноманітних матеріалів а також текст програми роботи мікроконтролера та акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання дисертаційних досліджень отримано нове вирішення актуальної науково-технічної задачі, що полягає у вдосконаленні методу контролю складу речовин шляхом визначення їх теплопровідності та створенні засобу з підвищеними показниками точності, продуктивності та розширеними функціональними можливостями, що їх реалізує. Отримано такі основні результати:

1. Аналіз сучасного стану контролю та визначення складу речовин показав, що існуючі методи не в повній мірі враховують всі складові процесу теплообміну при визначенні теплофізичних характеристик, які є одними з основних при визначенні властивостей речовин. Тоді як існуючі прилади не забезпечують одночасне вимірювання багатьох досліджуваних зразків, що часто унеможливорює відтворення та отримання достовірних результатів досліджень. Запропоновано вирішити поставлені задачі за допомогою методу прямого розігріву термістора.

2. Вдосконалено метод контролю складу речовин при визначенні їх теплопровідності на основі використання покращеної математичної моделі та вимірної величини саморозігріву термістора у методі його прямого підігріву, що дозволило підвищити інформаційну чутливість методу до зміни компонентного складу речовини.

3. Створено математичну модель, яка описує процес визначення теплопровідності та враховує умови розповсюдження теплової енергії від чутливого елемента, що покритий захисною оболонкою, і дала змогу:

– вперше запропонувати способи підвищення точності вимірювання теплопровідності речовин шляхом введення корегуючих коефіцієнтів за одночасного вимірювання в однакових умовах великої кількості зразків мінімального об'єму;

– вперше запропоновано спосіб визначення наявності та ступеню імунологічної реакції за відхиленням абсолютних значень теплопровідності суміші крові з алергеном від накопичених середньостатистичних даних.

4. Створено дослідний зразок багатоканального приладу для вимірювання коефіцієнта теплопровідності речовин з похибкою, що не перевищує 3% та

загальним часом вимірювання не більше 20 хвилин, що дозволило розробити й обґрунтувати шляхи зниження похибки вимірювання та зменшити час проведення досліджень. На створений прилад отримано патент України на винахід за №113044 від 25.11.2016.

5. Створено алгоритмічне та програмне забезпечення системи обробки результатів дослідження для розробленого багатоканального приладу, що дозволяє здійснювати одночасне визначення теплопровідності великої кількості досліджуваних зразків.

6. В результаті проведених досліджень з використанням еталонних речовин з відомими ТФХ встановлено числові значення корегуючих коефіцієнтів. Представлено результати вимірювання теплопровідності досліджуваних речовин в діапазоні від 0,1 Вт/м*К до 1,0 Вт/м*К з врахуванням корегуючих коефіцієнтів, що підтвердило можливість використання вдосконаленого методу та розробленого приладу для визначення та контролю складу досліджуваних речовин.

7. На основі проведених експериментальних досліджень з використанням багатоканального приладу обґрунтовано шляхи зменшення загальної похибки вимірювання коефіцієнта теплопровідності досліджуваних речовин і розроблено алгоритмічні, схемо-технічні та конструктивно-технологічні рекомендації щодо їх реалізації. Виконано аналіз дестабілізуючих факторів та причин їх виникнення, що впливають на похибку вимірювання, і впроваджено засоби зниження похибки вимірювання теплопровідності до 1,5%. Шляхом проведення комплексу сеансів вимірювання теплопровідності речовин та їх порівняння з відомими досліджуваними речовинами встановлено, що запропонована математична модель визначення коефіцієнта теплопровідності є адекватною за критерієм Фішера з довірчою ймовірністю 0,95.

8. Виконана апробація вдосконаленого методу визначення і контролю складу речовин шляхом вимірювання їх теплопровідності з застосуванням вдосконаленого методу прямого підігріву термістора та розробленого приладу:

- в біології та медицині при дослідженні імунологічної реакції пацієнтів на найпоширеніші алергени, що підтвердила можливість застосування даного методу для виявлення ступеню імунологічної реакції біологічних проб;

- для вимірювання ТФХ матеріалів, наведено результати відповідних досліджень, що підтвердило можливість їх застосування при визначенні складу та контролю твердих матеріалів за допомогою експериментальної установки.

Результати дисертаційної роботи пройшли дослідну перевірку та впроваджено в виробництво ТОВ «ВІРКОМ», ПП «УКРТЕХМЕД» та в навчальний процес кафедри виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Matvienko S., Vysloukh S., Martynchyk O. Determination thermal and physical characteristics of liquids using pulse heating thermistor method. *International Journal of Engineering Research and Science*. 2016. Vol.2, Iss. 5. P.250-258; ISSN №2395-6992.

(іноземне видання). Здобувачем досліджено можливість використання методу прямого підігріву термістора для вимірювання ТФХ рідин та твердих матеріалів.

2. Matvienko S., Vysloukh S., Martynchyk O. Increasing accuracy of measuring thermal conductivity of liquids by using the direct heating thermistor method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 4, No.5(82). P. 20-30. DOI : 10.15587/1729-4061.2016.75459. (Scopus). Здобувачем розроблено математичну модель розповсюдження теплової енергії від термістора при його розігріві та запропоновано функціональну та електричну схеми приладу для вимірювання теплопровідності речовин.

3. Матвієнко С.М., Вислоух С.П. Підвищення точності вимірювання теплопровідності рідин методом прямого підігріву термістора. *Наукові вісті НТУУ “КПІ”*. 2016. № 6. С. 85–93. (DOAJ, Index Copernicus). Здобувачем здійснено аналіз причин виникнення похибки вимірювання та можливості підвищення точності вимірювання ТФХ речовин методом прямого підігріву термістора.

4. Матвієнко С.М., Вислоух С.П., Філоненко К.Г. Вимірювання теплопровідності твердих матеріалів методом прямого підігріву термістора. *Наукові вісті НТУУ “КПІ”*. 2017. № 2. С. 97–107. (DOAJ, Index Copernicus). Здобувачем розроблено експериментальну установку для вимірювання теплопровідності твердих матеріалів методом імпульсного розігріву термістора.

5. Матвієнко С. М., Тимчик Г. С., Терещенко М. Ф., Матвієнко А. М. Вплив процесів конвекції в рідині на похибку вимірювання теплопровідності методом прямого підігріву термістора. *Наукові вісті НТУУ “КПІ”*. 2017. № 5. С. 110–122. (DOAJ, Index Copernicus). Здобувачем досліджено вплив процесів конвекції в досліджуваній речовині на похибку вимірювання теплопровідності методом прямого підігріву термістора та обґрунтовано вибір оптимальної конструкції датчика.

6. Тимчик Г. С., Вислоух С. П., Матвієнко С. М. Контроль складу речовин за допомогою «методу теплопровідності». *Перспективні технології та прилади*. 2018. № 12. С. 157–163. Здобувачем підтверджена можливість контролю вмісту неоднорідних речовин, а саме при випаданні осаду або розшиаруванні досліджуваної суміші.

7. Патент України на винахід №113044, Пристрій та спосіб реєстрації теплових процесів у біологічних пробах / Мартинчук О.А.; Матвієнко С. М.; Вислоух С.П.; Заявник и власник Мартинчук О.А.; Матвієнко С. М.; Вислоух С.П. – опубл. 25.11.2016, Бюл.№ 22/2016. Здобувачем запропоновано конструктивні особливості приладу для здійснення реєстрації теплових процесів у біологічних пробах та визначення ступеня імунологічної реакції за ТФХ сумішею біологічних проб та алергенів.

8. Патент на корисну модель України №119756, G01N 25/18 (2006.01) Пристрій для вимірювання коефіцієнта теплопровідності різноманітних речовин / Матвієнко С.М., Вислоух С.П., Терещенко М.Ф., Матвієнко А.М.; заявл. 29.03.2017, опубл. 10. 10. 2017, Бюл. №19 /2017

9. Матвієнко С. М., Філіппова М. В., Мартинчук О. А. Дослідження теплопровідності матеріалів за допомогою методу імпульсної термістометрії. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. 2015.

Вип.6(95). С. 106-112. (*Index Copernicus*). Здобувачем здійснено аналіз сучасних методів та пристроїв дослідження ТФХ речовин.

10. Филиппова М.В., Матвиенко С.Н. К вопросу разработки системы измерения теплопроводности методом импульсной термистометрии. Приборостроение – 2014: материалы VII Международной научно-технической конференции (г. Минск, 19-21 ноября 2014 г.). Минск: БНТУ, 2014. С. 110-111.

11. Матвиенко С.Н., Филиппова М.В. Вимірювання теплопровідності рідин та матеріалів методом імпульсного підігріву термістора. Погляд у майбутнє приладобудування: збірник тез доповідей VII науково-практичної конференції студентів та аспірантів (м. Київ, 22-23 квітня 2015 р.). Київ: НТУУ «КПІ», 2015. С. 52.

12. Філіппова М.В., Матвієнко С.М. Експериментальна установка для вимірювання теплопровідності. Приладобудування: стан і перспективи: збірник тез доповідей 14 Міжнародної науково-технічної конференції. (м. Київ, 22-23 квітня 2015 р.). Київ: НТТУ «КПІ», 2015. С. 78-79.

13. Матвиенко С. Н., Вислоух С. П. Исследование методов измерения теплопроводности с использованием термисторов. Новые направления развития приборостроения: материалы 8-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов (г. Минск, 22-24 апреля 2015 г.) Минск: БНТУ, 2015. С. 285.

14. Матвиенко С.Н. , Вислоух С.П., Матвиенко А.Н. Экспериментальная установка для измерения теплопроводности твердых материалов. Современная наука и образование: материалы II Всероссийской научно-практической конференции (Новосибирск, 14 января 2016 г.). Новосибирск: ООО «ЦСРНИ», 2016. С. 44-49.

15. Матвиенко С. Н., Вислоух С. П. Конструктивные особенности экспериментальной установки для измерения теплопроводности крови. Приладобудування: стан і перспективи: збірник тез доповідей 15-тої Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 17-18 травня 2016 р.). Київ: НТТУ «КПІ», 2016. С. 122-123.

16. Матвиенко С. Н., Вислоух С. П. Возможность определения теплофизических свойств жидкостей и материалов методом термистометрии. Новые направления развития приборостроения: сборник тезисов докладов 9-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов (г. Минск, 20-21 апреля 2016 г.). Минск: БНТУ, 2016. С. 117.

17. Матвиенко С. Н., Вислоух С. П. Программный комплекс обработки результатов исследований измерения теплопроводности жидкостей и материалов методом термистометрии. Інформатика, Математика, Автоматика. ІМА: 2016: матеріали науково-технічної конференції (м. Суми, 18–22 квітня 2016 р.). Суми. 2016. С. 206.

18. Матвиенко С.Н., Вислоух С.П. Оптимизация процесса измерения теплопроводности методом импульсного подогрева термістора. Приладобудування: стан і перспективи: збірник тез доповідей 15-тої Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 17-18 травня 2016 р.). Київ: НТТУ «КПІ», 2016. С. 65.

19. Матвієнко С. М., Матвієнко А. М. Вимірювання коефіцієнта теплопровідності крові пацієнтів методом прямого підігріву термістора. Приладобудування: стан і перспективи: збірник тез доповідей 16-тої Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 16-17 травня 2017 р.). Київ: НТТУ «КПІ імені І. Сікорського», 2017. С. 112 – 113.

20. Матвієнко С. М., Вислоух С. П. Вимірювання коефіцієнта теплопровідності нанорідин методом прямого підігріву термістора. Приладобудування: стан і перспективи: збірник тез доповідей 16-тої Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 16-17 травня 2017 р.). Київ: НТТУ «КПІ імені І. Сікорського», 2017. С. 62–63.

21. Матвиенко С. Н., Матвиенко А. М., Терещенко Н. Ф. Исследование теплопроводности неоднородных биологических растворов методом прямого разогрева термистора. Приборостроение – 2017: материалы X Международной научно-технической конференции (г. Минск, 1-3 ноября 2017г.). Минск: БНТУ, 2017. С. 50 – 51.

22. Матвієнко С. М., Матвієнко А. М. Підготовка зразків при дослідженні теплофізичних характеристик біологічних речовин. Приладобудування: стан і перспективи: збірник тез доповідей 17-тої Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 15-16 травня 2018 р.). Київ: НТТУ «КПІ імені І. Сікорського», 2018. С. 114–115.

23. Tymchik G., Vysloukh S., Tereshchenko N., Matvienko S. Investigation thermal conductivity of biological materials by direct heating hermistor method. 2018 IEEE 38th International Conference on ELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY (ELNANO) (Kyiv, 24.04.2018). Kyiv, 2018. P. 429-434.

АНОТАЦІЯ

Матвієнко С.М. Вдосконалення методу визначення складу речовин за їх теплопровідністю. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2019.

Дисертаційна робота присвячена вибору ефективного методу контролю та визначення складу речовин за величиною їх теплофізичних характеристик (ТФХ), вдосконаленню математичної моделі визначення теплопровідності й розробці відповідного приладу з підвищеними метрологічними характеристиками – точністю, ймовірністю та швидкодією.

В роботі науково обґрунтовано застосування методу прямого підігріву термістора для контролю та визначення складу речовин за їх теплопровідністю.

Представлено вдосконалену математичну модель визначення теплопровідності речовин та обґрунтовано необхідність введення корегуючих коефіцієнтів в розрахункову формулу методу визначення складу речовин та їх контролю.

Наведено конструкцію розробленого багатоканального приладу для вимірювання ТФХ досліджуваних речовин та визначення їх складу на основі величини теплопровідності, а також відповідне математичне та програмне забезпечення системи керування процесом вимірювання та обробки результатів досліджень.

Представлено результати вимірювання теплопровідності досліджуваних речовин з коефіцієнтами в діапазоні від 0,1 Вт/м*К до 1,0 Вт/м*К, що підтвердило можливість використання вдосконаленого методу та розробленого приладу для визначення та контролю складу речовин на основі їх теплопровідності.

Ключові слова: неруйнівний контроль, склад речовин, теплопровідність речовин, метод прямого підігріву, термістор, саморозігрів термістора, термограма розігріву, прилад для визначення теплопровідності речовин.

АННОТАЦИЯ

Матвиенко С.М. Совершенствование метода определения состава веществ по их теплопроводности. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определения состава веществ. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, 2019.

Диссертация посвящена выбору эффективного метода контроля и определения состава веществ по величине их теплофизических характеристик (ТФХ), совершенствованию математической модели определения теплопроводности и разработке соответствующего прибора с повышенными метрологическими характеристиками – точностью, достоверностью и быстродействием.

В работе научно обосновано применение метода прямого подогрева термистора для контроля и определения состава веществ по их теплопроводности.

Представлено усовершенствованную математическую модель определения теплопроводности веществ и обоснована необходимость введения корректирующих коэффициентов в расчетную формулу метода определения состава веществ и их контроля.

Приведено конструкцию разработанного многоканального прибора для измерения ТФХ исследуемых веществ и определения их состава на основе величины теплопроводности, а также соответствующее математическое и программное обеспечение системы управления процессом измерения и обработки результатов исследований.

Представлено порядок проведения экспериментальных исследований при определении теплопроводности веществ методом прямого подогрева термистора. Представлены результаты измерения теплопроводности исследуемых веществ с коэффициентами в диапазоне от 0,1 Вт/м*К до 1,0 Вт/м*К, что подтвердило возможность использования усовершенствованного метода и разработанного прибора для определения и контроля состава веществ на основе их теплопроводности.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, состав веществ, теплопроводность веществ, метод прямого подогрева, термистор, саморазогрев термистора, термограмма разогрева, прибор для определения теплопроводности веществ.

ABSTRACT

Matvienko S. Improvement method for determination of the substances composition by their thermal conductivity. – Manuscript.

Thesis for scientific degree of candidate of technical sciences on specialty 05.11.13 – Devices and Methods for Testing and Materials Structure Determination. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, 2019.

This work devoted to scientific substantiation and improvement of the method for control and determining the thermal conductivity of substances with thermistor use as a sensitive element and development an instrument which makes the process of measuring the thermal conductivity of substances by a nondestructive method much simpler and enables the simultaneous research of large number of samples with improved measurement accuracy.

In the work, the direct heating thermistor method for control the thermal conductivity of substances is scientifically justified. The choice and design of sensitive elements for measuring their thermal and physical characteristics (TPC) is substantiated.

Developed mathematical model for calculating the thermal conductivity of substances based heating thermistor thermogram. Calculated formula for improved method that determines the coefficient of substance thermal conductivity is generalized relative dependence of heating thermistor power consumed to its geometric dimensions and values of the thermogram heating temperature at control points.

In order to increase the accuracy of TPC substances determination under investigation, were introduced into the mathematical model a number of correction factors, which was obtained by measuring on reference substances with known TPC.

The use of correction coefficients in the mathematical model for determining the thermal conductivity of substances taking into account the test sample temperature, the compensation of temperature difference measured by thermistor to its average value, the value at the ADC output, the temperature of the thermistor self-heating caused by presence of the shell, and sensitivity of the probe thermistor to thermal conductivity of test substance, allowed to get a general error measurement that does not exceed 3%.

An design developed multi-channel instrument for measuring substances TPC studied, which is based on the results of research testing stand and the appropriate software and mathematical software for process control measurements and processing of research results.

Presented methodology of experimental research for determining the thermal conductivity of substances by direct heating thermistor method. The results of measuring the thermal conductivity of the test substances ratios ranging from 0.1 W/m*K to 1.0 W/m*K, which confirmed the possibility of using the improved method and device designed to determine the thermal conductivity of substances.

The experimental plant to measure TPC solid materials and the results of measuring thermal conductivity of different materials in a range of 0.15 W/m*K to 0.7 W/m*K, confirming the possibility of using the method of direct heating thermistor to measure the thermal conductivity of solid, relatively solid and bulk materials. The possibility of applying the proposed device in biology and medicine and presents the results of researches by immune responses of patients to the most common allergens.

As dissertation research result, a new solution of the actual scientific and technical problem, which consists in improving the method for determining the coefficient of thermal conductivity for various substances by value of thermistor self-heating temperature in the investigated environment, is obtained. Developed the device for measuring the heat conductivity coefficient of liquids using a direct heating thermistor method is that extends the functionality of method and reduces the measuring the thermal conductivity of substances process error that not exceeding 3%.

Using the proposed method of direct heating thermistor probe due to the small size and simple design of the device allows its use in various industries, medicine and biology to determine TPC different materials with high precision measurements.

Keywords: non-destructive testing, composition of substances, thermal conductivity of substances, direct heating method, thermistor, thermistor self-heating, heating thermogram, device for determining the thermal conductivity of substances.